УДК 621.384.6.08

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ ЭФФЕКТА СМИТА-ПАРСЕЛЛА НА БАЗЕ ЭЛЕКТРОННОГО МИКРОСКОПА ЭММА-2U

Ю.Н. Адищев, А.В. Вуколов, А.П. Потылицын, Г. Кубе*

Томский политехнический университет
E-mail: vukolov@interact.phtd.tpu.edu.ru
*DESY, Германия

Создана экспериментальная установка для изучения сдвига линии излучения Смита-Парселла в оптической области спектра на пучке электронного микроскопа с конечным эмиттансом при азимутальном повороте решетки. Экспериментальная установка позволяет проводить исследования характеристик излучения Смита-Парселла при гарантированном отсутствии взаимодействия электронного пучка с материалом мишени.

Введение

В последние годы в ряде мировых научных центров были созданы лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) для генерации интенсивного монохроматического излучения в инфракрасном и субмиллиметровом диапазонах. Подобные ЛСЭ используют пучок электронов с энергией порядка 50...200 МэВ, проходящий через ондулятор с периодом в несколько см. Одной из перспективных схем является ЛСЭ, основанный на эффекте Смита-Парселла (СП), который позволяет получать монохроматическое излучение в указанном диапазоне на пучке электронов с энергией 1 МэВ, проходящем вблизи периодической мишени (решетки). В ряде работ указывалось на возможность регулировки длины волны при повороте решетки в плоскости, перпендикулярной пучку. Излучение Смита-Парселла генерируется при прохождении заряженной частицы в вакууме параллельно периодической поверхности дифракционной решетки (см. рис. 1). Механизм излучения был предсказан Франком [1] и впервые экспериментально наблюдался Смитом и Парселлом [2] в оптическом диапазоне. Этот эффект вызвал значительный интерес у исследователей как возможный механизм для создания лазеров на свободных электронах в различных диапазонах длин волн [3–7]. Физический смысл эффекта СП состоит в следующем: пучок электронов, движущийся вблизи проводящей мишени, индуцирует на ее поверхности токи, которые генерируют так называемое дифракционное излучение. В случае периодической проводящей мишени (оптическая решетка) возникает интерференция излучения от разных элементов мишени, что приводит к появлению монохроматических линий в спектре излучения. Положение линии определяется углом излучения и периодом решетки согласно известному дисперсионному соотношению [2]:

$$\lambda_n = \frac{D}{|n|}\left(\frac{1}{\beta} - \cos\theta\cos\Phi\right), \qquad (1)$$

где λ – длина волны излучения, D – период решетки, n – порядок дифракции, $\beta=v/c$ – отношение скорости электрона к скорости света, θ и Φ – углы излучения, представленные на рис. 1. На рис. 1 также показано d – расстояние между пучком и решеткой, L – длина решетки, $\vec{k}$ – волновой вектор излучения, α_{blaze} – угол наклона профиля решетки.

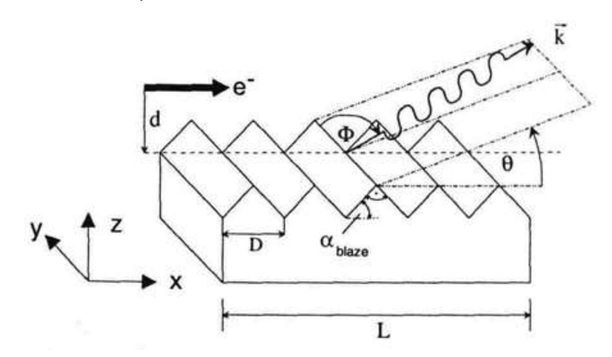


Рис. 1. *Геометрия процесса излучения*

Угловое распределение числа фотонов, излученных для n-ого порядка дифракции, дается выражением:

$$\frac{dN}{d\Omega} = \alpha\,|n|\,N_\omega \frac{\sin^2\theta\sin^2\Phi}{(1/\beta - \cos\theta\sin\Phi)^2}\times$$
$$\times|R_n|^2 \exp\left(-\frac{4\pi d}{\lambda\beta\gamma}\sqrt{1+(\beta\gamma\cos\Phi)^2}\right), \qquad (2)$$

здесь α=1/137 – постоянная тонкой структуры, N_ω>>1 – число периодов решетки, d – расстояние от пучка до решетки, $|R_n|^2$ – радиационный фактор, который определяется профилем решетки, γ – Лоренц-фактор.

Согласно соотношению (2) интенсивность падает экспоненциально с увеличением расстояния d между пучком электронов и поверхностью решетки. Длина взаимодействия

$$h_{\mathrm{int}} = \frac{\lambda\beta\gamma}{4\pi},$$

определяет эффективность "связи" между пучком и решеткой. В эксперименте [2] размер пучка электронов 0,15 мм был много больше, чем длина взаимодействия $h_{\mathrm{int}}\approx10^{-8}$ м, однако выход монохроматических фотонов для пучка электронов с энергией 300 кэВ и током 5 мкА был достаточен для детектирования фотометрическим методом. При азимутальном повороте решетки на угол δ по модели [3] должен наблюдаться сдвиг излучения линии СП. Длина волны излучения СП в данном случае определяется из соотношения:

$$\lambda_n = \frac{D}{|n|\cos\delta}\left(\frac{1}{\beta} - \cos\theta\cos\varphi\right). \quad (3)$$

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка для получения и исследования излучения Смита-Парселла в оптическом диапазоне длин волн была создана на основе электронного микроскопа ЭММА-2. Схема установки показана на рис. 2. Экспериментальные условия (угол наблюдения Θ=130°, ток и энергия пучка, общее расположение решетки, пучка и монохроматора) были выбраны исходя из конструктивных возможностей электронного микроскопа. На врезке рис. 2 показано взаимное расположение пучка и решетки. Характеристики решетки, выполненной из стекла ВК7: α_{blaze}=26,44°; D=833 нм (1200 лин/мм); $L\times B\times H$=25×25×10 мм (L – длина, B – ширина, H – высота решетки). На поверхность решетки напылен слой алюминия (толщина 700±50 нм). Для подобной решетки согласно расчетам по формуле (1) для энергии пучка 75 кэВ должно наблюдаться под углом Θ=130° монохроматическое излучение СП для λ_3=745 нм (для третьего порядка дифракции, n=3). Спектр излучения в диапазоне $\lambda\approx$500...800 нм измерялся с помощью оптического монохроматора.

В эксперименте использовался микроскоп ЭММА-2У с ускоряющим напряжением до 100 кВ и током I_{max}=95 мкА. Электронная пушка создает пучок электронов, который с помощью конденсорных линз формируется и направляется на исследуемый объект. В качестве источника электронов в микроскопе используется V-образный вольфрамовый термокатод. Рабочее ускоряющее напряжение варьируется от 50 до 100 кВ. Для каждого значения напряжения ток достигает фиксированного значения; 50 кВ соответствует 62,5 мкА, а 75 кВ – 93,7 мкА. Нестабильность ускоряющего напряжения за 1 мин – $9\cdot10^{-6}$, пульсации ускоряющего напряжения – 250 мВ.

Повысить плотность тока пучка можно за счет повышения удельной эмиссии катода. Повышение удельной эмиссии вольфрамовых катодов возможно только за счет повышения температуры тела накала. Однако при этом сокращается срок его службы. Что касается величины угла схождения пучка, то она связана с конкретной конструкцией электронного микроскопа.

При очень больших и малых напряжениях смещения образуются расходящиеся электронные пучки. Только в оптимальном случае электроны, уходящие с катода, попадают в однородное поле и поэтому образуют параллельный пучок. Для того, чтобы иметь возможность в широких пределах изменять условия освещения объекта, в осветительную систему вводят конденсор, используя однолинзовую конденсорную систему, что позволяет получить диаметр пучка, сфокусированного на объект, приблизительно 50 мкм. С двухлинзовым конденсором можно достичь минимального размера пучка $d_{min}\approx$2 мкм в центре колонны (между конденсорами – 3 и системой перемещения – 4, рис. 2). В нашем случае решетка располагалась в нижней части колонны. Поэтому точное определение размеров пучка проводилось с помощью специального устройства (микровинта).

Микровинт устанавливался в электронный микроскоп вместо бокового окна наблюдения для передвижения решетки или измерения параметров пучка с минимальным шагом 1,5 мкм. Смотровые окна микроскопа, через которые устанавливается микровинт, располагаются под углом 45° к оси колонны микроскопа и, соответственно, к пучку. Поэтому передвижение вдвигаемых элементов (решетка, и т.д.) происходит под углом в 45°.

Микровинт позволяет также вращать решетку вокруг своей оси, что использовалось для исследования, возможности регулирования длины волны излучения Смита-Парселла. Все операции микровинта автоматизированы и производятся программой, выполненной в стандарте КАМАК.

Схема измерения приведена на рис. 3. Диаметр пучка измерялся одновременно в четырех точках при перемещении непроводящей подложки с укрепленными на ней металлическими пластинами (как показано на рис. 3). Подложка прикреплялась к микровинту, что позволяло перемещать ее и измерять ток вторичной эмиссии от каждой пластины в зависимости от величины смещения. Пластины располагались на точно зафиксированных расстояниях друг от друга. Ток вторичной эмиссии с каждой пластины усиливался и преобразовывался аналого-цифровым преобразователем, после чего отображался в виде графика на экране монитора. Перемещение подложки происходило с заданным шагом этой же измерительной системой.

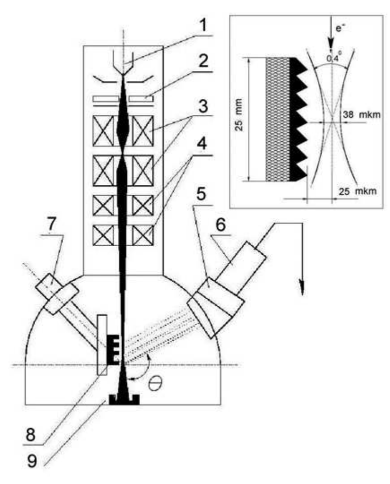


Рис. 2. *Экспериментальная установка: 1) катод; 2) анод; 3) конденсоры; 4) система перемещения; 5) монохроматор; 6) ФЭУ; 7) микровинт; 8) решетка; 9) цилиндр Фарадея*

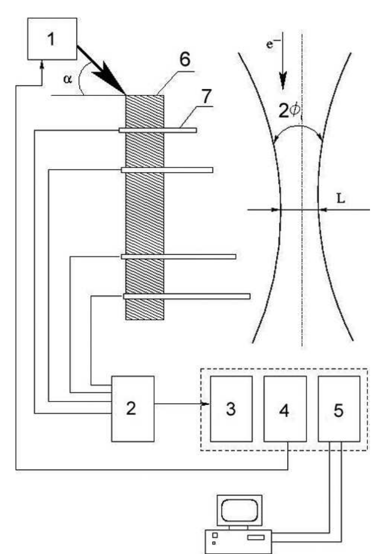


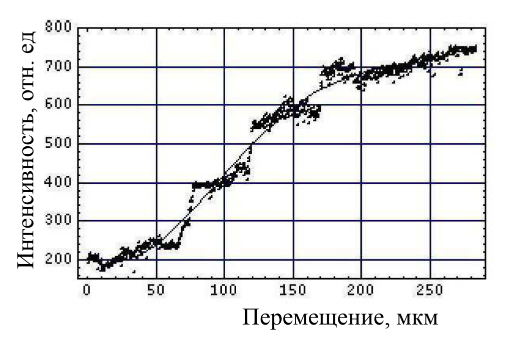
Рис. 3. *Схема измерения параметров пучка: 1) шаговый двигатель; 2) усилитель; 3) аналого-цифровой преобразователь; 4) блок управления двигателем; 5) контроллер; 6) диэлектрическая подложка; 7) пластина*

Таким образом, получена информация о поперечных размерах пучка в четырех точках. Для примера на рис. 4, *а* показана измеренная величина тока вторичной эмиссии в зависимости от перемещения пластины относительно пучка. На рис. 4, *б* показано распределение по поперечному размеру пучка, полученное дифференцированием измеренной кривой.

Измеренные и обработанные данные приведены в таблице.

Таблица. *Размеры пучка*

№ пластины	Поперечный размер пучка, измеренный, мкм	Расстояние между пластинами, мм
1	p_1=178,2	d_1=4,5
2	p_2=118,8	d_2=4,9
3	p_3=118,8	d_3=18,8
4	p_4=163,3	–



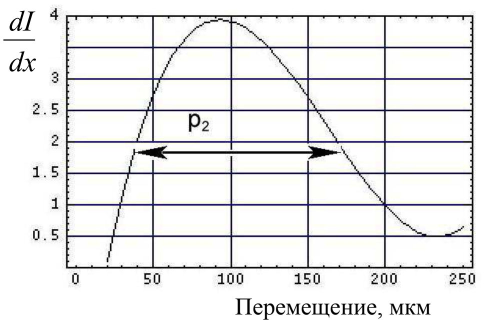


Рис. 4. *Зависимость тока вторичной эмиссии от перемещения пластины относительно пучка и распределение по поперечному размеру пучка, полученное дифференцированием измеренной кривой*

Для проведения расчета поперечного размера пучка в фокусе и определения расходимости пучка, построена диаграмма (см. рис. 5). Из диаграммы видно как, зная размеры в четырех различных точках пучка, можно определить диаметр пучка в фокусе.

Через (*d, p*) обозначены измеряемые величины, тогда как штрихами (d', p') обозначены размеры вычисляемые (*d* – расстояние между пластинами; *p* – диаметры сечения конусов образованных пучком электронов; h_1 – высота конуса; φ и β – углы при вершинах верхнего и нижнего конусов, аппроксимирующих расходящийся пучок; α – угол наклона микровинта относительно оси пучка; Δ – ошибка при вычислении истинного размера пучка).

Из рис. 5 следует, что углы β и φ определяются как:

$$\mathrm{tg}\beta = \frac{p_1' - p_2'}{2d_1'} \text{ и } \mathrm{tg}\varphi = \frac{p_4' - p_3'}{2d_2'}, \quad (4)$$

высоты конусов, образованных пучком электронов, находятся из соотношений:

$$h_1 = \frac{p_1'}{2\mathrm{tg}\beta} \; и \; h_2 = \frac{p_4'}{2\mathrm{tg}\varphi}, \quad (5)$$

минимальный диаметр пучка в фокусе – *l* определяется исходя из построенной диаграммы как

$$\begin{cases} l = 2H_2\mathrm{tg}\varphi \\ l = 2H_1\mathrm{tg}\beta \end{cases}. \quad (6)$$

Далее, используя простые геометрические соотношения

$$H_2 + H_1 = \frac{l}{2\mathrm{tg}\varphi} + \frac{l}{2\mathrm{tg}\beta}, \quad (7)$$

$$d_3' = h_1 + h_2 - H_2 - H_1, \quad (8)$$

$$H_2 + H_1 = h_1 + h_2 - d_3', \quad (9)$$

из формул (7–9) находим

$$l = \frac{\dfrac{p_1 d_1 \cos\alpha}{(p_1 \cos\alpha - p_2 \cos\alpha)} + \dfrac{p_4 d_2 \cos\alpha}{(p_4 \cos\alpha - p_3 \cos\alpha)} - d_3}{\dfrac{d_2}{(p_4 \cos\alpha - p_3 \cos\alpha)} + \dfrac{d_1}{(p_1 \cos\alpha - p_2 \cos\alpha)}}.$$

Используя значения из таблицы, получаем размер пучка в фокусе l=38,6 мкм, углы φ=0,18° и β=0,24°.

На рис. 6 показана общая схема монохроматора и способ его подключения к экспериментальной установке.

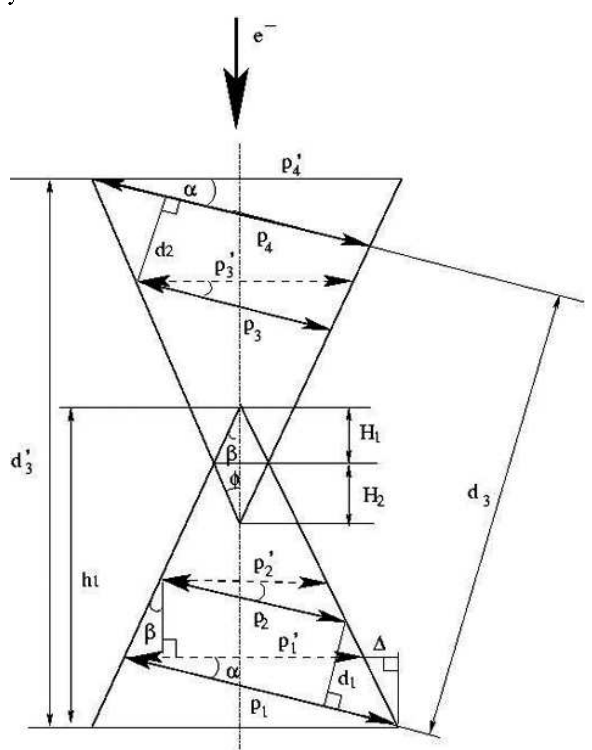


Рис. 5. Схема измерения параметров пучка

Монохроматор располагался относительно оси пучка электронов под углом 130°. Для калибровки монохроматора использовался лазер и два светодиода. Лазер с длиной волны λ=632,8 нм и шириной линии ≈10^{-2} нм необходим был для определения разрешения измерительной системы. Выбором щелей монохроматора измерительная система была настроена на разрешающую способность $\Delta\lambda$≈3,5 нм ($\Delta\lambda$ – полная ширина на полувысоте измеренного спектра, см. рис. 7). Апертура монохроматора с установленными щелями ≈$1{,}6\cdot10^{-4}$. Для калибровки системы использовали светодиоды: красный (АЛ307БМ, λ=665 нм) и синий (HLMP-Δ08, λ=490 нм).

Поворот монохроматорной призмы осуществлялся при помощи шагового двигателя (М) на рис. 6. Шаг двигателя задавался программой автоматического набора спектра излучения СП. Процесс измерения спектра (рис. 8) излучения СП сос-

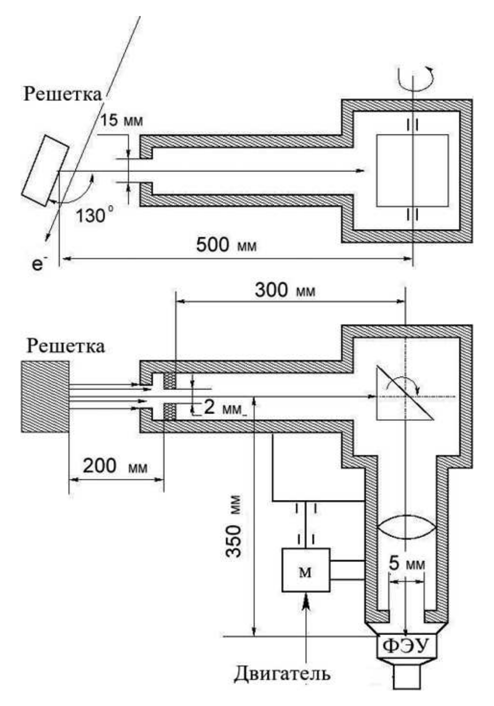


Рис. 6. Монохроматор

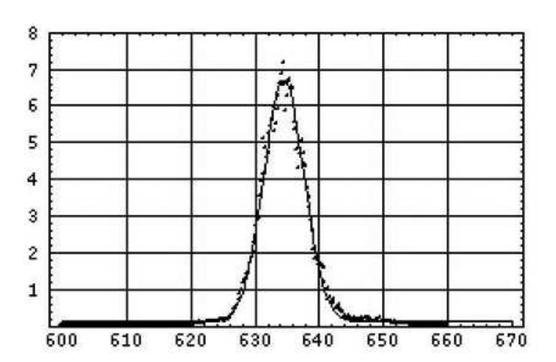


Рис. 7. Спектр лазерного излучения, полученного при помощи монохроматора

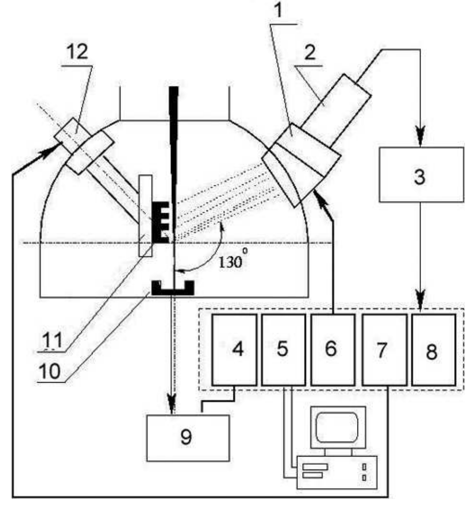


Рис. 8. Схема эксперимента: 1) монохроматор; 2) ФЭУ; 3) усилитель; 4) аналого-цифровой преобразователь; 5) контроллер; 6, 7) блоки управления двигателями; 8) счетчик; 9) усилитель; 10) цилиндр Фарадея; 11) решетка; 12) микровинт

тоял в следующем: сигнал с фотоумножителя ФЭУ-84-3 (с SbKNaCs фотокатодом конверсионной эффективностью 8 %, световой чувствительностью фотокатода $19 \cdot 10^{-5}$ А/лм и рабочим напряжением ≈1800 В) предварительно усиливался блоком усилителей – 3, собранных в стандарте ВЕКТОР. После оцифровывания сигнала блоком счетчиков – 8, собранных в стандарте КАМАК, информация передавалась через контроллер КК-012 – 5 в компьютер и отображалась в графическом виде. Далее, происходил поворот двигателя, то есть призмы, на некоторый предварительно задаваемый шаг и процесс измерения повторялся. Время измерения для каждого положения призмы тоже задавалось предварительно. Поворот решетки, вокруг оси, производился вручную. При повороте решетки на 5° установка позволяет зафиксировать сдвиг линии излучения СП.

В заключение следует отметить, что описанная экспериментальная установка позволяет проводить исследования характеристик излучения СП при гарантированном отсутствии взаимодействия электронного пучка с материалом мишени. В нашей установке при d<25 мкм пучок касался решетки в верхних и нижних точках, что приводило к интенсивному свечению решетки, обусловленному переходным излучением, видимым невооруженным глазом. Поэтому, для чистоты эксперимента необходимо выдерживать расстояние не менее 25 мкм. Следует отметить, что в работах [5, 6] приведены экспериментальные данные об интенсивности излучения СП в оптическом диапазоне, отличающиеся друг от друга более чем на два порядка. По нашему мнению, такая разница в выходе излучения СП может быть связана как раз с неконтролируемым взаимодействием электронов с оптической решеткой в эксперименте [6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Франк М. Оптическое излучение // Известия АН СССР. – 1942. – № 3. – С. 6–9.
2. Smith S.J., Purcell E.M. Visible light from localized surface charges moving across a grating // Phys. Rev. – 1953. – V. 92. – № 4. – P. 1069.
3. Haeberle O. Electromagnetic radiation generated by relativistic electrons interacting with a diffraction grating: Dissertation. – University Louis Pasteur. Strasburg, 1994 (France).
4. Kube G. Observation of optical Smith-Purcell radiation at an electron beam energy of 855 MeV: Dissertation. – Institute of a nuclear physics. University Mainz, 1998 (Germany).
5. Gover A.J. Angular radiation pattern of Smith-Purcell radiation // J. Opt. Soc. Amer. B. – 1984. – № 1. – P. 723–726.
6. Shih I., Salisbery W.W. Measurements of Smith-Purcell radiation // J. Opt. Soc. Amer. B. – 1989. – № 1. – P. 345–348.
7. Ishizuka H., Kawamura Y., Yokoo K. Smith-Purcell experiment utilizing a field-emitter array cathode: measurements of radiation // Nucl. Instr. Meth. A. – 2000. – № 445. – P. 276–280.
8. Urata J., Goldstein M., Kimmitt M.F., Naumov A., Platt C., Walsh J.E. Superradiant Smith-Purcell Emission // Phys. Rev. – 1998. – V. 80. – P. 516–519.

УДК 537.533